

На правах рукописи



**Хегай Лаура Сергеевна**

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС НА ОСНОВЕ  
ЭНТРОПИЙНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы  
(в машиностроении)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Волгоград – 2018

Работа выполнена на кафедре «Информационные и управляющие системы» Волгоградского инженерно-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
**Чернов Александр Викторович.**

**Официальные оппоненты:** **Городецкий Андрей Емельянович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Институт проблем машиноведения РАН,  
лаборатория интеллектуальных  
электромеханических систем, заведующий;

**Шайхутдинов Данил Вадимович,**  
кандидат технических наук,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Российский государственный  
политехнический университет (НПИ) имени М.И.  
Платова», кафедра «Информационные и  
измерительные системы и технологии», доцент.

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (национальный  
исследовательский университет) имени И.М.  
Губкина», г. Москва.

Защита состоится «30» марта 2018 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д212.028.05, созданного на базе Волгоградского государственного технического университета, по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru) Волгоградского государственного технического университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Авдеюк Оксана Алексеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Безопасность эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) во многом обеспечивается диагностикой ее оборудования. Диагностика проводится в период ежегодного планово-предупредительного ремонта блоков АЭС, который длится около одного месяца. Перед отделом технической диагностики АЭС ставится задача определения технического состояния нескольких тысяч единиц энергетического оборудования. С использованием штатной системы регистрируются сигналы, которые подвергаются анализу согласно утвержденной методике. По результатам диагностирования, оборудование либо допускается к дальнейшей эксплуатации, либо подвергается ремонту или замене. На АЭС особенное внимание уделяется оценке состояния электроприводной арматуры и электромеханического оборудования, такого как насосы, вентиляторы, приводы системы управления и защиты, дизель-генераторы. В качестве диагностической информации используются виброакустические и токовые сигналы.

Обработка диагностических сигналов современными методами заключается в использовании статистических методов, а также методов анализирующих регулярную составляющую: преобразование Фурье, вейвлет-преобразование.

Однако учитывая сложность динамических взаимодействий при наличии дефектов электромеханического оборудования, применение традиционных методов обработки является недостаточным и в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей: Адаменкова К.А., Генкина М.Д., Павелко В.И., Финкеля Б.М., Абидовой Е.А.<sup>1</sup>, Чернова А.В., Адамса М.Л., Абу-Махфуза И.А. - показано, что электромеханическое оборудование демонстрирует хаотическое поведение, что отражается в характере диагностических сигналов. Такие нерегулярные составляющие сигнала не могут быть эффективно идентифицированы традиционными методами.

Настоящее исследование, в основном, направлено на диагностику широко распространенных дефектов, таких как износ электромеханического оборудования, неисправность приводов, протечки, методами анализа нерегулярной составляющей диагностических сигналов. Разработка программно-технического комплекса диагностики на основе методов энтропийной параметризации направлена на повышение надежности и экономичности функционирования оборудования АЭС.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является повышение безопасности атомных электростанций за счет совершенствования системы диагностики электромеханического оборудования, обеспечивающей анализ нелинейных процессов в объекте диагностирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) анализ факторов, приводящих к появлению нелинейных составляющих в диагностическом сигнале оборудования;
- 2) выбор методов анализа нелинейных особенностей диагностических сигналов (ДС);
- 3) создание методики энтропийной обработки диагностической информации;

---

<sup>1</sup>Выражаю благодарность за помощь в подготовке диссертации к.т.н., доценту кафедры ИиУС Е.А. Абидовой

4) создание комплекса программ для обработки диагностической информации;

5) экспериментальная проверка методики в лабораторных и промышленных условиях.

#### **Методы и средства исследований**

При решении поставленных задач использовались методы имитационного моделирования, спектрального анализа, методы энтропийной параметризации временных рядов. Экспериментальные исследования проводились на промышленном и лабораторном оборудовании с помощью цифровой информационно-измерительной системы.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается результатами проверки эффективности:

- предлагаемых методов в условиях проведения эксперимента на стендовых установках;

- диагностической системы в условиях проведения эксперимента в период планово-предупредительного ремонта (ППР) Нововоронежской АЭС.

#### **Внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы были использованы при проведении диагностического обследования электроприводной арматуры (ЭПА) на Нововоронежской АЭС.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Обоснование комплекса энтропийных показателей, обеспечивающих оценку вариабельности, сложности и хаотичности диагностической информации.

2. Методика расчета энтропийных параметров диагностических сигналов электротехнических систем;

3. Структурная конфигурация информационно-диагностической системы содержащая блок «энтропийные преобразования» обеспечивающий повышение чувствительности диагностических процедур.

#### **Научная новизна работы**

Установлено, что влияние дефектов, возникающих в процессе эксплуатации электромеханического оборудования, приводит к возникновению сложных динамических взаимодействий проявление которых в диагностических сигналах может быть выявлено методами нелинейной динамики и оценено количественными энтропийными показателями.

#### **Теоретическая и практическая ценность работы**

Показано, что количественная оценка проявлений хаотической динамики в сигналах электромеханического оборудования может быть произведена с использованием энтропийных параметров. Совместное использование детерминированных подходов и методов энтропийной параметризации позволило повысить качество диагностирования оборудования АЭС.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Указанная область исследований соответствует паспорту специальности 05.11.16 – «Информационно-измерительные и управляющие системы (в машиностроении)», а именно: пункту 2 – «Новые методы и технические средства контроля и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих

систем»; пункту 4 – «Методы и системы программного и информационного обеспечения процессов отработки и испытаний образцов информационно-измерительных и управляющих систем»; пункту 5 – «Методы анализа технического состояния, диагностики и идентификации информационно-измерительных и управляющих систем»; пункту 6 – «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- XII Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики», 2016г., г. Волгоград;
- XIII Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики», 2017г., г. Волгоград;
- XIII Международная научно-техническая конференция «Динамика технических систем» (ДТС-2017), 2017 г., г. Ростов-на-Дону.

#### **Личный вклад автора**

Лично автором выполнены теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие связать проявления дефектов электромеханического оборудования с энтропийными параметрами диагностических сигналов. Автором разработан комплекс программ для вычисления энтропийных параметров диагностических сигналов [1-8].

Основные результаты, полученные в ходе выполнения работы, были обсуждены с участием д.т.н., профессора Чернова А.В., директора и заместителя директора НИИ «Атомного энергетического машиностроения» ВИТИ НИЯУ МИФИ к.т.н, Никифорова В.Н., к.т.н. Пугачевой О.Ю.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 8 работ, из них 5 по списку ВАК, из которых 3 – в журналах по специальности 05.11.16.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 138 страницах основного текста, содержит 54 рисунка, 16 таблиц, 96 библиографических наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации был проведен анализ существующих методов обработки информации в диагностических системах и анализ диагностических систем электромеханического оборудования АЭС, из которого следует что известные методы могут быть разделены на:

- 1) методы на основе анализа диагностических сигналов;
- 2) методы логико-вычислительной обработки диагностической информации;
- 3) методы на основе моделирования эталонных состояний;
- 4) методы распознавания образов;
- 5) методы слияния данных.

Методы на основе анализа сигнала, такие как спектральный анализ, широко используются для контроля состояния оборудования с помощью виброакустического сигнала, тока питания двигателя, акустической эмиссии и т. д.

В основу традиционных, широко распространенных методов заложены интегральные преобразования на базе систем ортонормированных, тригонометрических и специальных функций таких как преобразование Фурье, а также локализованных функций – вейвлетов. Методы анализа сигналов сводятся к выделению параметров регулярных составляющих. При этом предполагается, что данные обладают свойствами стационарности, линейности, а их параметры с заданной точностью описываются суперпозицией гладких функций.

Методы логико-вычислительной обработки позволяют объединить информацию, осуществить процессы моделирования, распознавание образов, построение эталонов. Однако подобные подходы не охватывают большой класс временных последовательностей, не обладающих свойствами линейности и стационарности в необходимом приближении. Сложные и нелинейные характеристики диагностической информации не могут быть оценены статистическими и частотными методами.

Оценки нелинейных параметров обеспечивают хорошую альтернативу выделения признаков дефектов, скрытых в измеренных сигналах, которые не могут быть эффективно идентифицированы с использованием традиционных методов.

Таким образом, цель предлагаемой работы - повышение безопасности атомных электростанций за счет совершенствования системы диагностики электромеханического оборудования, обеспечивающей анализ нелинейных процессов в объекте диагностирования.

**Вторая глава** посвящена исследованию проявления дефектов в диагностируемом оборудовании. С помощью методов моделирования показан рост хаотичности в сигналах вибрации оборудования, имеющего неисправность в механической части. Согласно данным Квашнина В.О., Сиротина Д.В., Пугачёвой О.Ю. имеющаяся неисправность проявляется и в сигнале тока питания данного оборудования. Причем в работах Адамса М.Л. и Абу-Макфуза И.А. установлены

закономерности перехода работы оборудования от стабильного режима к хаотическому в соответствии с усугублением неисправности.

Для описания характера проявлений различных динамических факторов в ДС было рассмотрено два случая. Первый случай (рисунок 1) соответствует износу зубчатых пар с периодами вращения  $T_{вр}$  и зубозацепления  $T_z$ . При попадании дефекта в зону контакта должно возбуждаться амплитудно-модулированное колебание с глубиной модуляции  $\mu$ , являющейся случайной величиной, зависящей от степени проявления дефекта. Результирующий сигнал представляет собой произведение медленно меняющейся амплитуды  $g(t, \mu)$  и быстро меняющейся функции жесткости зацепления  $h(t)$ . Как видно, в результирующем колебании в зависимости от значения  $\mu$ , возрастает вариабельность.

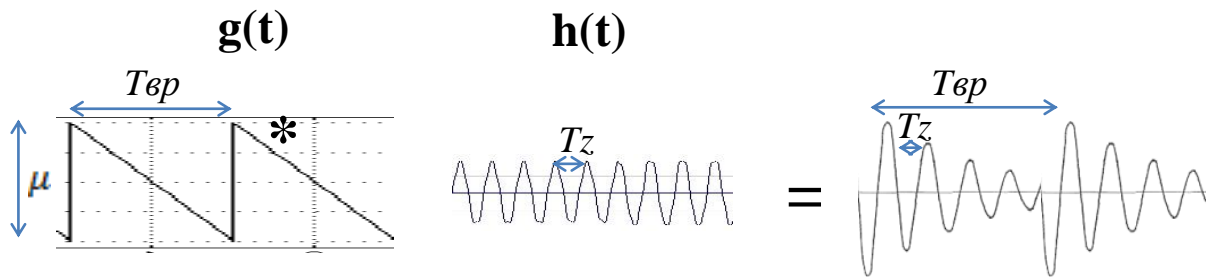


Рисунок 1 - Формирование импульсного диагностического сигнала под влиянием дефекта

С другой стороны, с появлением повышенного трения во взаимодействующих деталях (рисунок 2), низкочастотные импульсы складываются с высокочастотными колебаниями. Результирующий диагностический сигнал является фазомодулированным, со случайным индексом фазовой модуляции  $\nu$ , зависящим от степени развития дефекта.

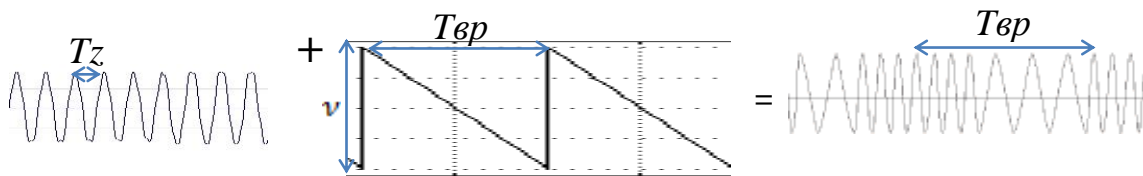


Рисунок 2 - Формирование сложного диагностического сигнала под влиянием дефекта

Одновременное увеличение сложности, хаотичности и вариабельности диагностического сигнала затрудняет использование традиционных частотных методов диагностики.

Таким образом, для количественной оценки проявлений хаотической динамики в сигналах электромеханического оборудования целесообразно использовать методы параметризации, инвариантные к указанным проявлениям, в частности - энтропийные методы.

*Энтропия Шеннона* характеризует степень вариабельность процесса. По увеличению значения энтропии Шеннона мы можем судить о влиянии дефекта на исследуемый сигнал. Расчет энтропии Шеннона основан на формуле, предложенной К. Шенноном для вычисления информационной энтропии:

$$H_{sh} = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  - вероятность попадания значения из выборки в  $i$ -ый уровень.

Энтропия Шеннона дает количественную оценку отклонения распределения значений временного ряда по уровням от равномерного. В случае заполнения значениями одного из уровней энтропия Шеннона  $H_{sh}=0$ . Когда же значения распределены равномерно по уровням, энтропия Шеннона максимальна и равна  $\log n$ , где  $n$  - количество уровней.

На рисунках 3а и 3б представлен сигнал тока арматуры до и после проведения ремонта соответственно. Энтропия Шеннона для представленных сигналов равна:  $H_{sh}=12,7$  (до ремонта) и  $H_{sh}=10,2$  (после ремонта). Видно, что энтропия Шеннона реагирует на изменение состояния оборудования, в данном случае, уменьшается в результате проведения ремонта.

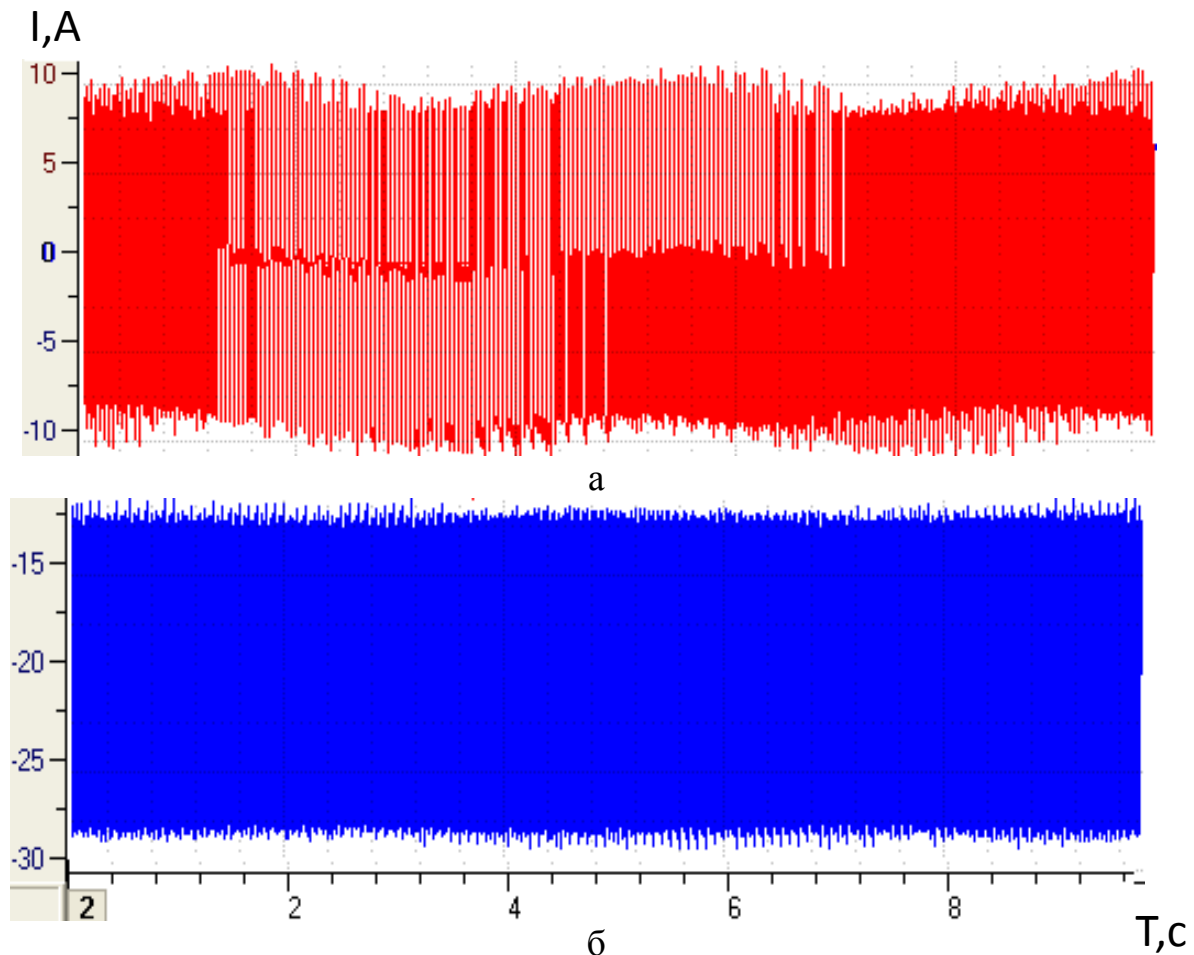


Рисунок 3 – Сигналы тока арматуры: задвижка в система основного конденсата привод ПВ05У2, типоразмер 1079-150-Э-02, диаметр условный 150 мм, условное давление 120, среда – вода: а – до ремонта; б - после ремонта

Таким образом, с помощью энтропии Шеннона можно количественно охарактеризовать распределение значений временного ряда. При изменении состояния системы меняется распределение его параметров, что приводит к изменению значения энтропии. Можно сказать, что энтропия Шеннона является

функцией состояния системы, так как количественно оценивает меру неопределенности значений параметров, характеризующих систему.

*Перестановочная энтропия* оценивает временной ряд с точки зрения отношений между элементами. В основе расчета перестановочной энтропии также лежит формула Шеннона, однако подход к расчёту вероятностной меры кардинально отличается.

Представим временной ряд  $X(i), i=1,2,\dots,N$  в виде векторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} X(1) = \{x(1), x(1 + \tau), \dots, x(1 + (n - 1)\tau)\} \\ \vdots \\ X(i) = \{x(i), x(i + \tau), \dots, x(i + (n - 1)\tau)\} \\ \vdots \\ X(N - (n - 1)\tau) = \{x(N - (n - 1)\tau), x(N - (n - 2)\tau), \dots, x(N)\} \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $n$  – размерность векторов;

$\tau$  - временная задержка.

Причем,  $n$  - число значений, содержащихся в каждом  $X(i)$ , может быть упорядочено в возрастающем порядке, так как

$$\{x(i + (j_1 - 1)\tau) \leq x(i + (j_2 - 1)\tau) \leq \dots \leq x(i + (j_m - 1)\tau)\}. \quad (3)$$

Таким образом, любой вектор  $X(i)$  может быть отображен на группу символов  $S(l) = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ , где  $l=1,2,\dots,k$  и  $k \leq n!$  ( $n!$  – наибольшее количество неповторяющихся символов).  $S(l)$  является одним из  $n!$  перестановок, которые отображаются на  $n$  числовых символов  $(j_1, j_2, \dots, j_n)$  в  $n$ -мерном пространстве вложения. Определим перестановочную энтропию временного ряда  $\{x(i), i = 1, 2, \dots, N\}$  порядка  $n$ , как  $H_{per}$   $k$  символьных последовательностей:

$$H_{per}(n) = - \sum_l^k P_l \log P_l, \quad (4)$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_k$  - вероятность появления во временном ряду, каждой последовательности символов соответственно, и  $\sum_{l=1}^k P_l = 1$ .

Максимальное значение  $H_{per}(n)$  равно  $\log(n!)$ , когда все последовательности символов равновероятны  $P_l = 1/n!$ , перестановочная энтропия минимальна при реализации одной из  $n!$  перестановок.

Для удобства пронормируем перестановочную энтропию. В результате нормализации минимальное значение  $H_{per}$  равно нулю, что соответствует регулярному временному ряду, а максимальное значение равно 1, когда все перестановки равновероятны, что возможно, например при белом шуме. Таким образом, чем выше значение перестановочной энтропии, тем более хаотичным является временной ряд, что дает возможность отследить даже небольшие изменения во временном ряду.

На рисунке 4 представлены сигналы вибрации, полученные в ходе эксперимента по исследованию дефекта подшипника. При расчете перестановочной энтропии были получены результаты для сигнала вибрации исправного подшипника (рисунок 4а)  $H_{per} = 0,85$ , а для подшипника с развитым дефектом (рисунок 4б)  $H_{per} = 0,95$ . Видно, что перестановочная энтропия реагирует на изменение состояния оборудования, в данном случае, увеличивается для вибрационного сигнала неисправного подшипника.

Одной из важнейших характеристик детерминированного хаоса считается энтропия Колмогорова, которая определяется как скорость потери информации о состоянии динамической системы с течением времени.

На практике мы имеем дело с временными рядами конечной длины, что делает невозможным применение энтропии Колмогорова, поэтому в нашей работе была использована приближенная оценка энтропии Колмогорова, названная *аппроксимационной энтропией*. Возможность данной замены обоснована в работах О.В. Чумака.

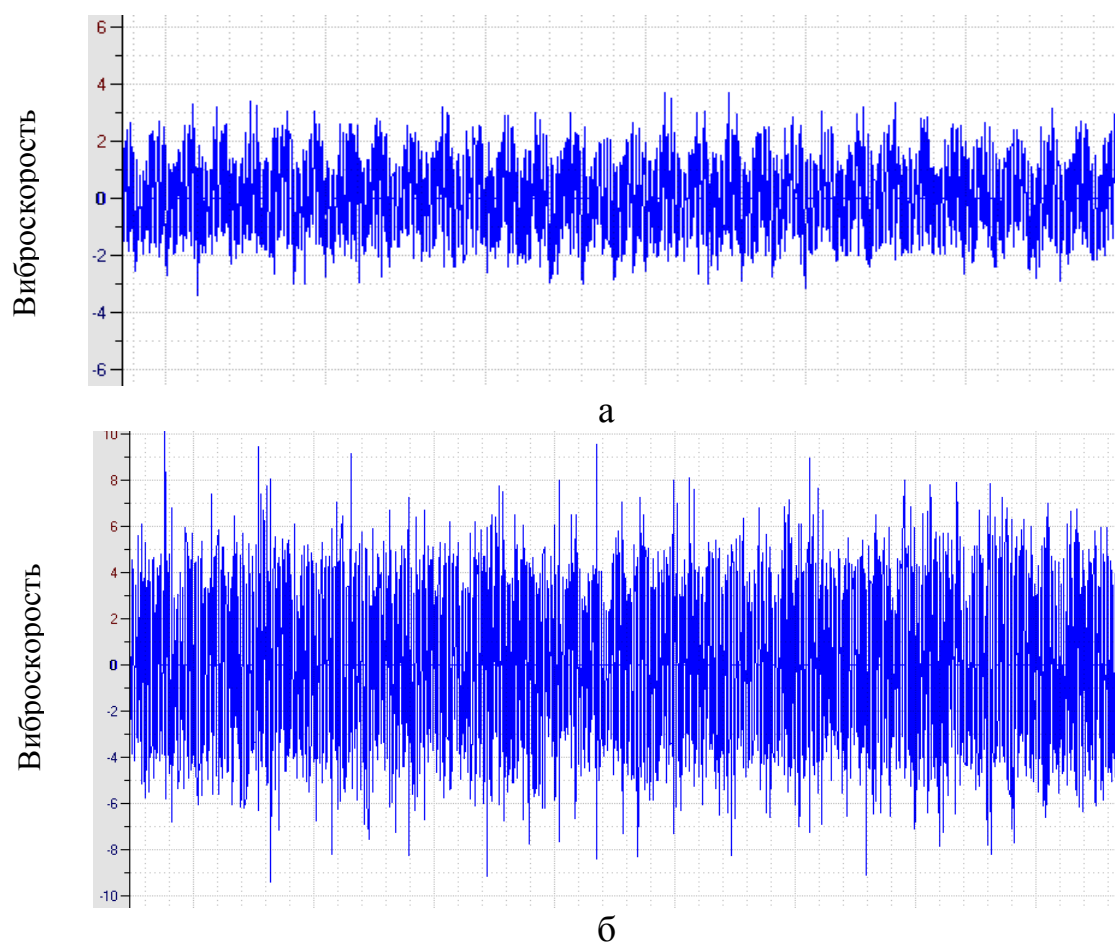


Рисунок 4 - Сигналы вибрации, полученные в ходе эксперимента по моделированию дефекта подшипника: а – исправный подшипник; б – подшипник с развитым дефектом

При вычислении аппроксимационной энтропии временной ряд так же разбивается на последовательность векторов длины  $m$ . Далее определяется расстояние  $d(X(i), X(j))$  между двумя  $X(i)$  и  $X(j)$  векторами:

$$d(X(i), X(j)) = \max_{k=1,2,\dots,m} (|x(i+k-1) - x(j+k-1)|), \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N - m + 1, j = 1, 2, \dots, N - m + 1$  и  $N$  – число отсчетов, содержащихся во временных рядах.

Затем для каждого вектора  $X(i)$  вычисляется  $C_i^m(r)$  – мера, описывающая сходство между вектором  $X(i)$  и всеми другими векторами:

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N - (m - 1)} \sum_{j \neq i} \Theta \{r - d[X(i), X(j)]\}, \quad (6)$$

где  $j = 1, 2, \dots, N - m + 1$ ;

$$\Theta\{x\} = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases};$$

$r$  – величина допуска, являющегося параметром фильтра шумов.

$$r = k \cdot std(S), \quad (7)$$

где  $k$  является константой ( $k > 0$ ), а  $std(S)$  представляет собой стандартное отклонение временного ряда.

Далее находим усредненное значение логарифма  $C_i^m(r)$ :

$$\varphi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_i \ln[C_i^m(r)], \quad i = 1, 2, \dots, N - m + 1. \quad (8)$$

Значение аппроксимационной энтропии временного ряда вычисляется как:

$$ApEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r)]. \quad (9)$$

Для практического применения используется ограниченный временной ряд, состоящий из  $N$  отсчетов, при этом значение  $ApEn$  временного ряда определяется как:

$$ApEn(m, r, N) = \varphi^m(r) - \varphi^{m+1}(r). \quad (10)$$

Уравнение (10) указывает на сходство между реконструированными векторами во временном ряду, когда размерность векторов увеличилась с  $m$  до  $m+1$ . Сходство отражает регулярность анализируемых временных рядов и сказывается на соответствующем значении  $ApEn$ . Чем больше регулярность, тем меньше значение  $ApEn$ .

Значение аппроксимационной энтропии для сигналов представленных на рисунках 3а и 3б.  $ApEn$  равна: 0,13 (до ремонта) и 0,07 (после ремонта). Величина  $ApEn$  показала чувствительность к изменению состояния оборудования. Для арматуры после ремонта значение  $ApEn$  уменьшилось на 0,06 ( $\approx 46\%$ ).

Таким образом, комплекс энтропийных параметров: энтропия Шеннона, перестановочная и аппроксимационная энтропии - позволяют оценить вариабельность, сложность и хаотичность диагностических сигналов.

**В третьей главе** представлен алгоритм диагностики электроприводной арматуры с использованием энтропийных методов.

Для построения автоматического классификатора и обоснованного отбора диагностических признаков оборудование было разделено на классы по состоянию:

- 1) арматура исправна;
- 2) арматура неисправна (начальная стадия дефекта), неисправность в электрической части;
- 3) арматура неисправна (развитый дефект), неисправность в электрической части;
- 4) арматура неисправна (начальная стадия дефекта), неисправность в механической части;
- 5) арматура неисправна (развитый дефект), неисправность в механической части.

В качестве первичных признаков при формировании признакового пространства методом главных компонент выбраны статистические, спектральные и хаотические характеристики оцифрованных сигналов.

Компоненты диагностического вектора (амплитуды в спектре  $I_r$ ,  $I_s$ , плавность хода  $Y_{\%}$ , энтропия Шеннона и перестановочная энтропия) могут быть представлены следующим выражением:

$$D = \begin{bmatrix} I_r \\ I_s \\ Y_{\%} \\ \text{Hsh} \\ \text{Hper} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Классификация состояний может быть описана при помощи булевских комбинаций (таблица 1). Причем соответствие текущего параметра эталону исправного состояния описываем логическим нулем, а отклонение параметра от эталона более, чем на 20%, описываем логической единицей.

Таблица 1 - Классификация состояний при помощи булевских комбинаций

| Состояние ЭПА   | Соответствие эталону исправного состояния |       |       |     |      |
|---|---|-------|-------|-----|------|
|   | $Y_{\%}$                                  | $I_r$ | $I_s$ | Hsh | Hper |
| Арматура исправна   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0    |
| Арматура неисправна (начальная стадия дефекта), неисправность в электрической части | 1   | 1     | 0     | 1   | 0    |
|   | 1   | 1     | 0     | 0   | 0    |
| Арматура неисправна (развитый дефект), неисправность в электрической части          | 1   | 1     | 0     | 1   | 1    |
| Арматура неисправна (начальная стадия дефекта), неисправность в механической части  | 1   | 1     | 1     | 1   | 0    |
|   | 1   | 1     | 1     | 0   | 0    |
| Арматура неисправна (развитый дефект), неисправность в механической части           | 1   | 1     | 1     | 1   | 1    |

Алгоритмизация процесса обработки сигналов тока ЭПА (алгоритм представлен на рисунке 5) связана с расчетом параметров, являющихся диагностическими признаками. Эти параметры формируют опорный вектор текущего состояния. Происходит сохранение параметров в базе данных. На основе сопоставления параметров исправного и текущего состояния формируются булевские комбинации, отражающие отклонение текущих параметров от исправного состояния. Булевские комбинации сопоставляются с эталонами, хранящимися в базе данных. Если соответствие не найдено, формируется сообщение об ошибке. Определенное текущее состояние предоставляется оператору и регистрируется в базе данных. Одновременно формируется когнитивный образ, который также предоставляется оператору.

Таким образом, алгоритм позволяет в автоматическом режиме классифицировать состояние диагностируемого оборудования.

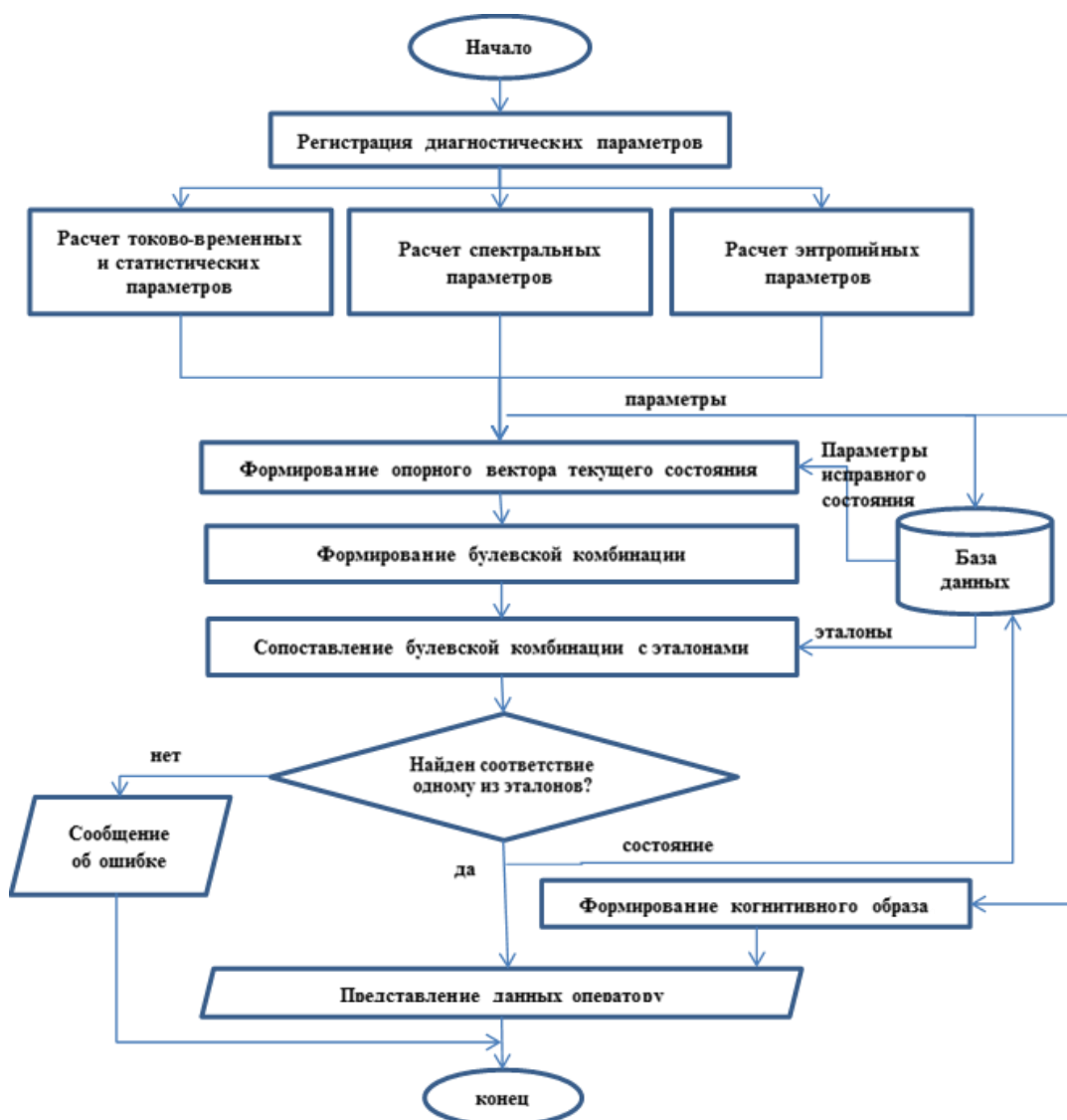


Рисунок 5 - Алгоритм диагностики электроприводной арматуры с использованием энтропийных методов

**В четвертой главе** проводится анализ метрологических требований к каналу измерения диагностического сигнала. Обосновывается выбор параметров для расчета комплекса энтропийных критериев, при которых обеспечивается заданная точность вычислений.

Для оценки влияния размера выборки и величины уровня на значение энтропии Шеннона были использованы сигналы вибрации подшипников полученные в экспериментальных условиях и токовый сигнал тока двигателя арматуры. Было показано, что при длине выборки  $N$  больше 2000 точек для вибрационного сигнала и больше 1000 для токового сигнала изменение значения  $H_{sh}$  становится незначительным. При исследовании влияния величины уровня на значение энтропии Шеннона, было показано, что при величине уровня от 0,01 до 0,09 значение энтропии Шеннона приближается к стационарному значению (варьирующее не превышает величины 0,01).

При оценке влияние длины выборки  $N$ , размерности  $n$  и временной задержки  $\tau$  на значение перестановочной энтропии было показано, что с увеличением длины выборки изменение энтропии становится незначительным, так при  $N=2000$  разность не превышает значения 0,007. Оценка влияния размерности векторов  $n$  и временной задержки  $\tau$  показала, что при  $n < 4$  перестановочная энтропия не обнаруживает динамические изменения в сигнале вибрации. Однако при  $n > 10$  значения вибрационного сигнала усредняются, что приводит к неинформативности полученных оценок. Поэтому рекомендуется выбирать размерность  $n=4 \div 9$ ,  $\tau=7$ .

Оценка влияния таких параметров как размер выборки, величины допуска и размерности на значение аппроксимационной энтропии показала, что при размере выборки превышающей 1500 отсчетов, изменение  $ApEn$  становится незначительным. Кроме того, с увеличением частоты дискретизации разница между значениями  $ApEn$ , рассчитанная для сигналов с различной частотой дискретизации, остается постоянной и не превышает 0,19. Также при обработке сигналов вращающихся механизмов целесообразно выбирать величину  $N$  больше, чем количество отсчетов, приходящихся на один оборот вала. С увеличением допуска  $k$  значение  $ApEn$  для различных  $m$  постепенно приближается к стационарной величине. Причем изменение значения аппроксимационной энтропии, рассчитанной для соответствующих  $m$ , становится незначительным, когда  $k$  приближается к 0,8. Следует отметить, что более высокое значение  $m$  приводит увеличению времени вычисления. Следовательно, целесообразно выбирать более низкое значение  $m$ .

На АЭС для сбора, хранения и обработки информации используется переносной многоканальный регистратор «Крона», включающий датчики, кабельные линии связи, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и персональный компьютер. Причем, для конкретных задач возможен выбор различных датчиков и АЦП.

В работе были определены основные свойства регистрируемых сигналов и выявлены основные требования к датчикам.

Были проанализированы основные характеристики датчиков вибрации. Указанным требованиям удовлетворяют датчики вибрации TR-26 АТЕХ, TR-26, предназначенные для измерения уровня вибрации механизмов и конструкций.

Исходя из аналогичных требований можно утверждать, что многофункциональные токовые клещи переменного тока (1000 А/ 100 А/ 5 А/ 0,5 А) А1281, применяемые, в частности, для диагностики электроприводной арматуры, могут обеспечить регистрацию диагностического сигнала.

Измеряемый аналоговый сигнал приводится к уровню АЦП  $\pm 5$  В и подвергается оцифровке. Определены погрешности, вносимые аналогово-цифровым преобразованием, основываясь на теореме Найквиста. Поскольку наибольшая значимая частота в сигнале тока и вибрации оборудования в зависимости от его конструкции, составляет 0,3-0,8 кГц, то частота дискретизации более 1,6 кГц, (например 2 кГц) удовлетворяет требованиям точности.

В работе было показано, что для расчета энтропийных параметров уровень квантования должен составлять 0,01-0,09. Такую точность может обеспечить АЦП с разрядностью выше 12.

Измерения в предлагаемой системе диагностики выполняются с использованием тех же технических средств, что и в штатной системе. Поэтому можно сказать, что инструментальные погрешности соответствуют погрешностям штатной системы, которая позволяет проводить измерение и анализ диагностических сигналов традиционными методами. В результате проведения службами атомной станции методологической аттестации разработанного измерительного канала погрешность измерений диагностических сигналов не превышает 5%.

Метрологический анализ позволил сформулировать обоснованные требования к параметрам информационно-измерительной системы (ИИС), при которых обеспечивается заданная точность.

В пятой главе рассматриваются результаты апробации программно-технического комплекса диагностирования в условиях эксплуатации АЭС. Проводится проверка эффективности предлагаемой ИИС в экспериментальных и промышленных условиях.

Для сбора, хранения и обработки информации использован переносной многоканальный регистратор «Крона».

В качестве методологического обеспечения при проведении диагностического обследования использована методика МТ 1.2.3.02.999.0085-2010 «Диагностирование трубопроводной электроприводной арматуры».

Согласно данной методике порядок проведения работ включает в себя следующие этапы:

- анализ перечня ЭПА, представленной для проведения технического диагностирования;
- подбор и анализ всей имеющейся в наличии в Базе данных необходимой технической документации по представленной арматуре, а также результатов предыдущего диагностирования;
- формирование типовых групп арматуры с учетом ее типоразмеров и типов приводов;
- предварительная обработка зарегистрированных токовых сигналов ЭПА;
- полный расчет и углубленный анализ диагностических параметров, сопоставление результатов с паспортными данными, нормативными документами, с допусками на параметры и выдача оперативных заключений о техническом состоянии электроприводного оборудования, включающих сравнительный анализ результатов обследования за предыдущие годы;
- составление протоколов измерений и расчетов с указанием выявленных отклонений диагностических параметров;
- расчет границ доверительных интервалов на диагностические параметры по типовым группам для заведомо исправной однотипной ЭПА и анализ отклонений фактически полученных диагностических параметров от полей допусков на эти параметры;
- комплексный сравнительный анализ результатов диагностирования с результатами предыдущих обследований, установление тенденций изменения технического состояния каждой единицы ЭПА;

- составление Актов-заключений о техническом состоянии электромеханической части ЭПА;

- подготовка материалов для обоснования возможности принятия технических решений по продлению межремонтного периода;

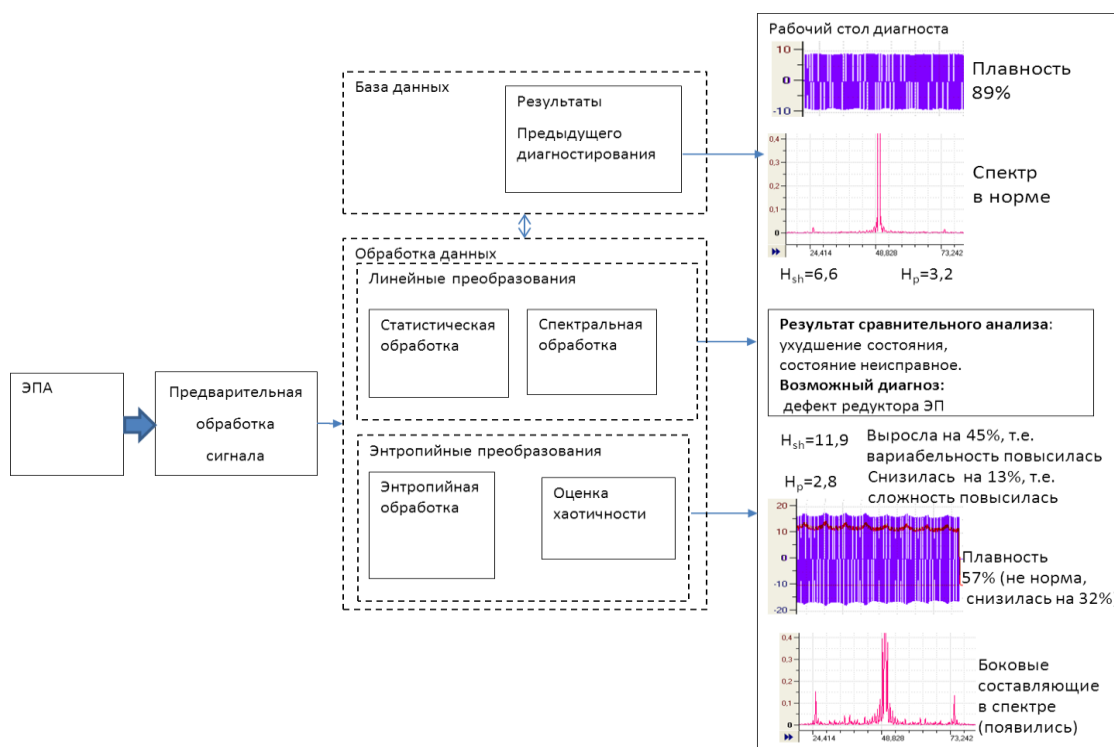
- дополнение и корректировка базы данных.

Штатная ИИС на основе комплекса «Крона» была дополнена блоком «Энтропийные преобразования» (рисунок 6). Данный блок включает операции по энтропийной обработке и оценке хаотичности сигнала.

Таким образом, система по результатам сравнительного анализа формирует предварительный диагноз. Окончательное заключение о техническом состоянии диагностируемого оборудования принимается диагностом.

Совместное использование энтропийных и линейных методов оценки диагностического сигнала позволяет значительно расширить спектр данных при определении технического состояния электромеханического оборудования.

В качестве программной среды для разработки программно-технического комплекса (рисунок 7) была выбрана интерактивная среда разработки и визуализации - Matlab.



Разработанная ИИС была опробована при диагностировании широкого класса устройств. Так при диагностировании ЭПА вычислялись токово-временные и спектральные параметры, а также энтропия Шеннона. Было обнаружено, что диагностические сигналы, кроме сигналов абсолютно исправных состояний, формируют два класса состояний: "отклонения в редукторе и ходовой части" и "отклонения в работе двигателя". Следует отметить, что данная классификация удобна с точки зрения разделения ремонтных работ между электрическим и механическим цехами.

Для количественной оценки технического состояния электромеханической системы и её деградации, были сформированы тестовые сигналы на основании сигналов тока, измеренных на обмотке статора двигателя. В качестве математической модели диагностического сигнала оборудования с разными стадиями дефекта можно рассматривать временной ряд, заданный последовательностью дискретных отсчетов, в котором степень регулярности находится в прямой зависимости от состояния оборудования.

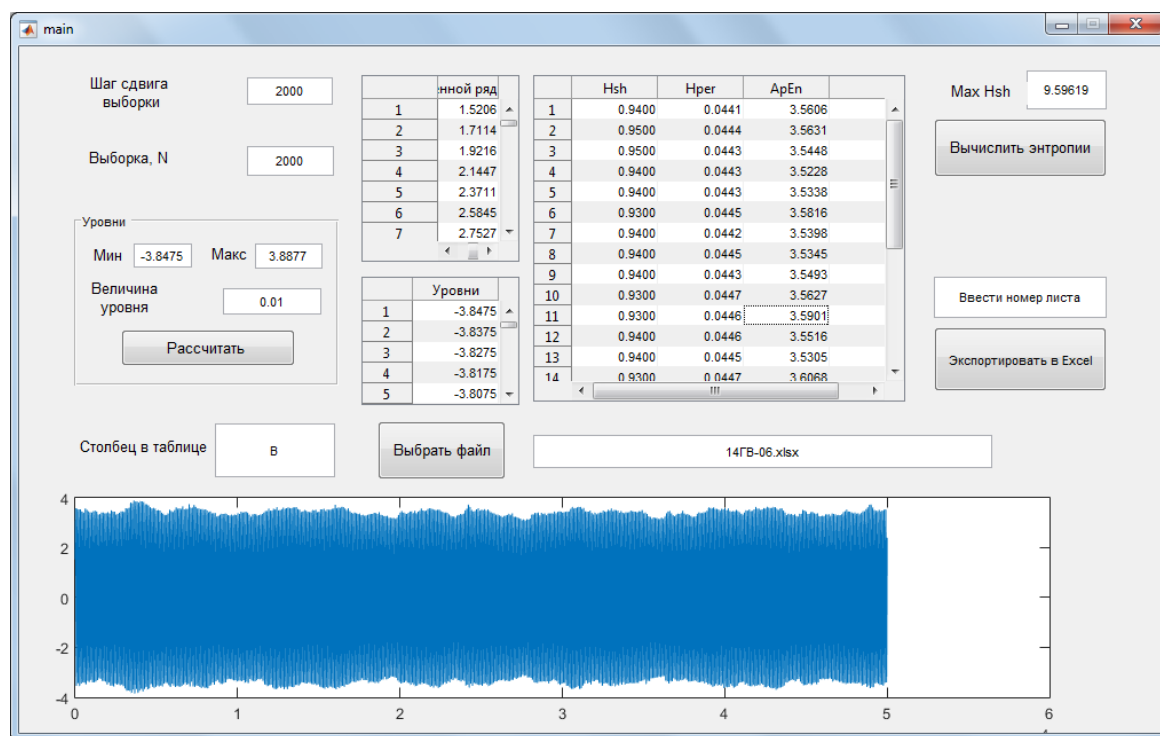


Рисунок 7 - Интерфейс пользователя программы расчета энтропийных параметров

На основании анализа сигналов тока двигателя арматуры, при наличии механических дефектов в приводе или ходовом узле, был сформирован тестовый сигнал с модуляцией.

В результате моделирования было выявлено, что развитие дефекта в сигнале сопровождается увеличением глубины модуляции, а в спектре - ростом боковых составляющих гармоник относительно несущей частоты  $f_n$ . Отмечено, что отклонение от синусоидальности более чем в два раза меняет показатели энтропии Шеннона, однако дальнейшее усугубление специфических признаков дефекта не приводит к существенному росту  $H_{sh}$ ; дальнейшее возрастание показателя энтропии определяется ростом шумовой составляющей.

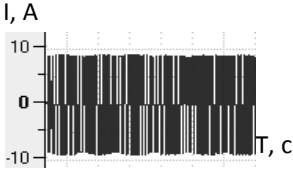
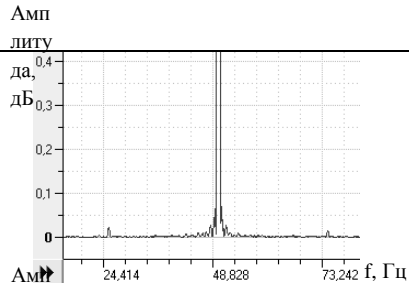
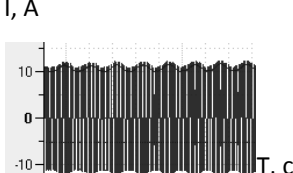
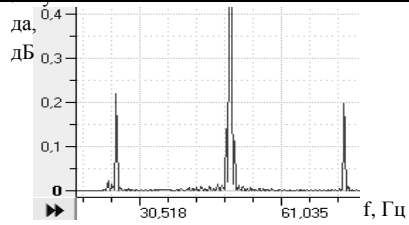
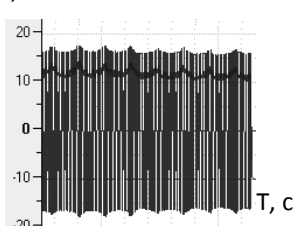
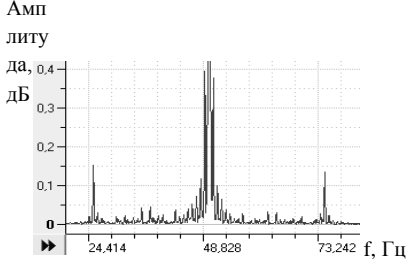
Другой тестовый сигнал связан с имитацией класса неисправностей работы двигателя. Ряд неисправностей (перекос фаз, короткое замыкание витков) можно описать тестовым сигналом со сложением.

Наличие дефекта характеризуется специфической, отличной от предыдущего представления, формой временного сигнала. В спектре данный класс дефектов не всегда проявляется. Возрастание показателя энтропии определяется ростом шумовой составляющей. Даже незначительный (менее 1% относительно амплитуды

сигнала) рост шумовой составляющей, практически не определяемый по сигналу и спектру, заметно влияет на показатель  $H_{sh}$ .

В работе представлены показатели энтропии сигналов ЭПА, эксплуатируемой на АЭС. Для этого сигналы были разделены на две группы: первая группа - сигналы оборудования с механическим дефектом «отклонение в работе ходового узла» (результаты представлены в таблице 2), сопровождающееся модуляцией в токовом сигнале и в спектре. Вторая группа - сигналы оборудования с дефектами электрической части (результаты представлены в таблице 3).

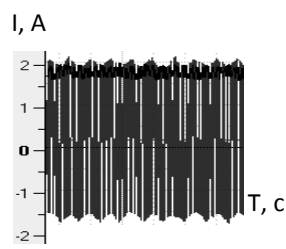
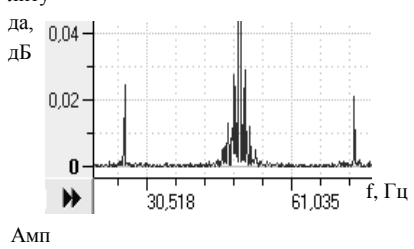
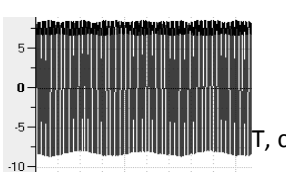
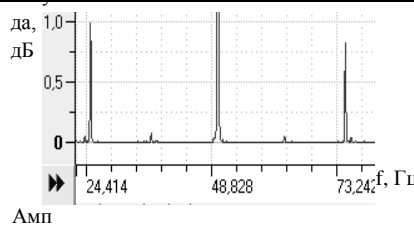
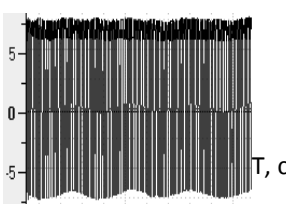
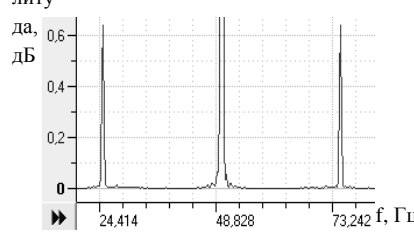
Таблица 2 - Результаты обработки диагностических сигналов с модуляцией

| № п/п | Обозначение арматуры/ плавность | Сигнал  | Спектр   | Энтропия Шеннона, $H_{sh}$ |
|-------|---------------------------------|---|--|----------------------------|
| 1     | 1ВК-2<br>89%                    |    |    | 6,6                        |
| 2     | 13ГО-01<br>79%                  |   |   | 10,4<br>(+37%)             |
| 3     | 14КГП-03<br>57%                 |  |  | 11,9<br>(+13%)             |

Таким образом, энтропия Шеннона оказалась эффективной мерой для определения состояния электромеханической системы. Исследования диагностических сигналов тока ЭПА показали, что ухудшение технического состояния оборудования может быть идентифицировано по увеличению значений  $H_{sh}$ . Значения  $H_{sh}$  оказались чувствительны к наличию и величине как к механическим, так и к электрическим повреждениям арматуры.

В рамках настоящего исследования помимо ЭПА диагностировалось различное оборудование, эксплуатируемое на АЭС: приводы СУЗ, лопастные насосы, дизельные генераторы. Регистрировались различные по физической природе диагностические сигналы: ток, вибрация, звук, ультразвук. Обработка данных производилась традиционными методами. Помимо этого, по тем же сигналам рассчитывались энтропийные индексы (ЭИ).

Таблица 3 - Результаты обработки диагностических сигналов со сложением

| № п/п | Обозначение арматуры/<br>плавность | Сигнал   | Спектр  | Энтропия Шеннона,<br>$H_{sh}$ |
|-------|------------------------------------|--|---|-------------------------------|
| 1     | 13ПЭ-01<br><br>76%                 |   |   | 10,9                          |
| 2     | 13ВК-95<br><br>73%                 |   |   | 11,6<br>(+6%)                 |
| 3     | 14ГО-09<br><br>70%                 |  |  | 11,5<br>(-1%)                 |

Положительный вывод о наличии зависимости между состоянием оборудования и значениями ЭИ можно сделать при обнаружении роста энтропий при образовании дефектов относительно исправного состояния. Экспериментальные исследования по использованию ЭИ дали положительные результаты.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Энергоблок АЭС содержит значительное количество запорной и регулирующей арматуры, работоспособность которой во многом определяет надежность и безопасность работы станции. Совершенствование средств диагностики электромеханических устройств за счет разработки новых методов обработки диагностической информации позволяет улучшить эксплуатационные показатели работы станции.

2. В структуре эксплуатационного персонала АЭС предусмотрено штатное диагностическое подразделение, оснащенное современными информационно-измерительными системами и методами обработки информации, базирующимися на использовании вероятностно-статистических и спектральных подходах. Результаты исследований в области нелинейной динамики обеспечивают предпосылки совершенствования диагностических систем за счет использования информации в сигналах, имеющих нелинейные и хаотические компоненты.

3. Использование теории временных рядов позволяет обосновать комплекс количественных энтропийных показателей обеспечивающих оценку проявлений дефектов различной физической природы в работе оборудования.

4. Использование современных средств программного и технического обеспечения позволяет осуществить модернизацию штатных информационно-диагностических систем введением блока нелинейных энтропийных преобразований с представлением результатов в реальном масштабе времени проведения диагностических операций.

5. Сравнительным анализом результатов экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и производственных условиях, установлено повышение чувствительности диагностических процедур при использовании количественных показателей variability, сложности и хаотичности диагностической информации.

6. В результате анализа метрологических характеристик измерительных процедур установлены требования к измерительному каналу и выбору средств измерения. Теоретическими и экспериментальными исследованиями определена величина методической погрешности и предложены варианты ее уменьшения.

7. Предлагаемая методика обработки диагностической информации разработанная для электромеханического оборудования, прошла апробацию при диагностике приводов системы управления и защиты, дизель-генераторного оборудования, вентиляционных агрегатов, насосов и электроприводной арматуры (в том числе негерметичности затвора). Исследования показали инвариантность методики к физической природе диагностического сигнала и возможности существенного расширения спектра ее использования.

8. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана структура информационно-диагностической системы, содержащей блок «энтропийные преобразования» и штатный многоканальный регистратор «Крона». В настоящее время система проходит апробацию в опытно-промышленных условиях.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Статьи в журналах из перечня ВАК РФ:**

1. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В., Булава В.А., Соловьёв В.И., Пугачёва О.Ю. Диагностирование дизель-генераторного оборудования АЭС с использованием детерминированных и стохастических методов. Глобальная ядерная безопасность. - 2016. - № 3 (20). - С. 74-79.

2. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В., Пугачёва О.Ю. Диагностирование электроприводной арматуры с использованием энтропийных показателей. Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4 (21). – С. 69-77.

### **Статьи в журналах из перечня ВАК РФ по специальности 05.11.16:**

3. Муха Ю.П., Чернов А.В., Абидова Е.А., Хегай Л.С. Алгоритмизация процесса обработки диагностических сигналов электроприводной арматуры с учетом хаотических составляющих [Электронный ресурс]: Инженерный вестник Дона №2 2017 – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4253](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4253).

4. Чернов А.В., Абидова Е.А., Хегай Л.С., Белоус М.А. Методика

диагностирования состояния электромеханических приводов систем управления и защиты реакторной установки [Электронный ресурс]: Инженерный вестник Дона №4 2017 – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4492](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4492)

5. Чернов А.В., Абидова Е.А., Хегай Л.С. Диагностика негерметичности в затворе электроприводной арматуры по энтропийным показателям звуковых и ультразвуковых сигналов [Электронный ресурс]: Инженерный вестник Дона №4 2017 – Режим доступа: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4493)

#### **Статьи и материалы конференций:**

6. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В., Бекетов В.Г. Энтропийные методы обработки диагностической информации. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD). – ISBN 978-5-7262-2256-1

7. Абидова Е.А., Хегай Л.С., Чернов А.В.Ю, Пугачёва О.Ю., Соловьёв В.И. Обработка диагностической информации при определении технического состояния дизель-генераторных установок АЭС. Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс]: тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф., 31 мая - 2 июня 2017 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD).

8. Чернов А.В., Абидова Е.А., Хегай Л.С., Белоус М.А., Лапкис А.А., Драка О.Е. Применение энтропии при диагностировании приводов СУЗ. Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей: сборник трудов. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017 – С. 235-239

Подписано к печати \_\_\_\_\_ 2018 г.

Бумага офсетная. Объём 1 усл.печ.л.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ИПО ВИТИ НИЯУ МИФИ

г. Волгодонск, ул. Ленина 73/94